doi:10.13866/j.azr.2020.01.05

东亚单层低云特性及其短波辐射强迫的季节变化①

司钰文[1]， 郑 宁[1]， 杨洪海[1]， 陈勇航[1]， 刘 琼[1]， 夏俊荣[2]， 张 华[3]
(1. 东华大学环境与科学工程学院，上海 201620；
2. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室，江苏 南京 210044；
3. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室，北京 100081)

摘 要： 利用云与地球辐射能量系统 CERES(clouds and the earth's radiant energy system)资料，对 2003—2016 年东亚不同区域单层低云物理属性及地面短波辐射强迫的季节时空分布特征进行研究。结果表明：① 在空间分布上，辐射强迫与单层低云量在春秋两季有着较好的相似性，而与冰/液态水柱含量在春、夏、秋三个季节有着较好的一致性。② 在时间变化上，北方地区夏季的单层低云对短波辐射的削弱作用是最强的；南方地区和西北地区最强的削弱作用发生在春季；东部海域则发生在冬季。在空间分布上，春、秋、冬季最强的低云削弱效应在南方地区。夏季，东亚低云对短波辐射的削弱作用各区域都较弱，大部分区域的负辐射强迫的绝对值小于 200 W·m^{-2}。

关键词： 单层云；低云；云物理属性；短波辐射强迫；东亚地区

太阳短波辐射能量占太阳辐射的 99%，而地表所接收的太阳短波辐射既是人们生产生活中能够直接利用的能量来源，又是地球大气运动和气候变化的最重要的驱动因子之一。因此，一些学者对各个地区太阳辐射资源的分布进行了研究[1-3]。由于到达地面的太阳辐射会受到云的减弱作用[4-6]，并且削弱作用可能达到 20%[7-8]，为了量化云对太阳辐射的影响，不少学者利用不同的观测资料估算了云对地—气系统短波辐射的强迫，如马晓燕等[9-10]的研究表明，云辐射强迫有着很明显的年变化、季节变化和区域变化特征，而且有学者发现，云辐射强迫的变化分布特征与云量有着较好的一致性[11-12]。

东亚地形复杂，是世界上季风气候最典型的地区，使得东亚云-辐射相互作用有着鲜明的地区特征。近年来，已有学者对东亚地表太阳辐射的气候平均、季节变化及年际变化特征进行了分析[13]。除此之外，彭杰等[14-15]利用 CloudSat /CALIPSO 卫星资料给出了东亚地区云物理属性的演变特征，为研究云的宏微观物理属性与太阳辐射的关系打下了基础。虽然对云的研究已有不少，但对单层云的研究仍然缺乏，已有的研究更重视单层云与多层云的比较[16-19]，而对东亚不同区域单层低云的研究尚不多见。再则，低云作为温度较高的水云，不仅是主要的降水来源，对太阳辐射的削弱作用也是最强的[20]，而数值预报模式中对云的考虑主要建立在均一单层云假设的基础上，因而，本文对单层低云的云物理属性与短波辐射强迫进行分析，以期在数值模拟中更准确地分析东亚不同区域云的特性提供参考。

本文利用 2003—2016 年云与地球辐射能量系统 CERES(clouds and the earth's radiant energy system)资料，将东亚地区分为 5 个子区域，分别对不同区域单层低云的云量和冰/液态水含量的季节时空分布特征及短波辐射强迫进行了研究，以揭示单层低云的宏微观物理属性与其短波辐射强迫的特性。

1 资料与分析方法

CERES 是 Aqua 卫星上搭载的探测器之一，数据空间分辨率为 20 km，有两个传感器：一个横向扫描，另一个 360°旋转扫描。本文所用数据是 CERES SSF Aqua Edition 3A 卫星观测数据。SSF(single satellite footprint)仅凭简单的扫描装置就可以获得 1 h 内"云与地球辐射能量系统"信息。SSF 将实时监测到的 CERES 数据和热带降雨测量卫星监测到的可

① **收稿日期：** 2019-07-09； **修订日期：** 2019-09-05
基金项目： 科技部国家重点研发计划(2017YFA0603502)；中国沙漠气象科学基金(SJM201506009)；国家自然科学基金项目(41675026，41175026)资助
作者简介： 司钰文(1995-)，女，硕士研究生，主要从事遥感卫星太阳辐射研究. E-mail:18321158192@163.com
通讯作者： 陈勇航. E-mail:yhh@dhu.edu.cn。

见光和红外扫描仪包含的高分辨率成像器与成像光谱仪的图像数据联系到一起。CERES 可以为我们提供很多信息,如每层的云量、冰/液态水柱含量、温度、辐射通量等等。

本文利用 ISCCP 云分类方法将东亚地区的单层云分为低云、中云和高云。云顶气压 > 680 hPa 为低云,440 ~ 680 hPa 为中云,小于 440 hPa 为高云。但据伯玥等[21]和张婷婷[22]的分析认为,由于青藏高原平均海拔在 4 000 m 以上,该高度气压值低于 680 hPa,造成青藏高原地区的低云数据很少或者几乎不存在。因此,本文不对西部地区进行分析。

本文参照《中国自然地理》[23](1995)中的划分方法(图 1),根据地形与气候将东亚地区(15° ~ 60° N,70° ~ 150°E)划分为 5 个区域:西北地区(NW)、西部地区(West)、北方地区(North)、南方地区(South)和东部海域(E. O),选取了单层低云的云量、冰水柱含量、液态水柱含量和短波辐射通量 4 个物理量进行研究。从卫星读取资料后,需要对所有像素点上的数据求平均,再插值到每个格点上。后续的处理分析根据格点进行,并对每个云参量进行平均,得出时间和空间上的多年平均值。为了方便分析,本文根据气象学将一年划分为四季:春季(3 月、4 月、5 月),夏季(6 月、7 月、8 月),秋季(9 月、10 月、11 月)和冬季(12 月、1 月、2 月)。

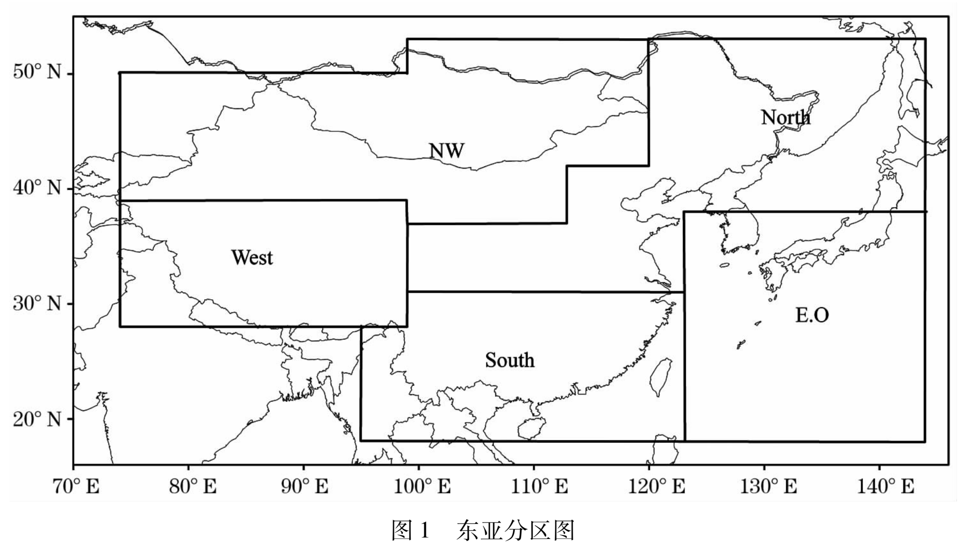


图 1 东亚分区图

Fig. 1 Zoning map of East Asia

2 单层低云量的季节时空分布

2.1 多年平均的季节变化

如表 1 所示,从东亚地区 4 个区域的单层低云量可以看出,低云量冬季偏多,夏季明显减少。冬季温度低,对流层低层稳定性强,不利于上升运动发展,低层的水汽难以向上输送,云的发展被抑制在对流层中低层[24];夏季气温高,大气层结不稳定,对流加强,云层会逐渐上升,在中、高层积聚,从而造成冬季低云量偏多,夏季偏少的现象。四季中,南方地区、西北地区和东部海域低云量的最大均值出现在冬季,均值分别为 61.55%、29.57% 和 59.63%;而北方地区的最大值均值都出现在夏季,均值为 40.33%。北方地区和西北地区秋季的单层低云量最少,均值分别为 34.67%、24.40%;其中,西北地区秋季单层低云量与夏季(24.65%)差异很小。南方地区和东部海域除了夏季低云量(34.66%、33.74%)较少外,其他季节的低云量都比较丰富,低云量都在 40% 以上。

Tab. 1 Seasonal change of the mean of single-layer low cloudage over different regions from 2003 to 2016 /%

季节	North	South	NW	E. O
春	37.01	52.01	28.22	46.44
夏	40.33	34.66	24.65	33.74
秋	34.67	47.56	24.40	42.01
冬	37.14	61.55	29.57	59.53

注:北方地区(North),南方地区(South),西北地区(NW),东部海域(E. O)。下同。

2.2 多年平均的季节空间分布

为了分析各季节单层低云量的地理空间分布特征,将低云量进行了四季划分。由图 2 可以看出,4 个季节单层低云量的空间分布有着明显的区域差

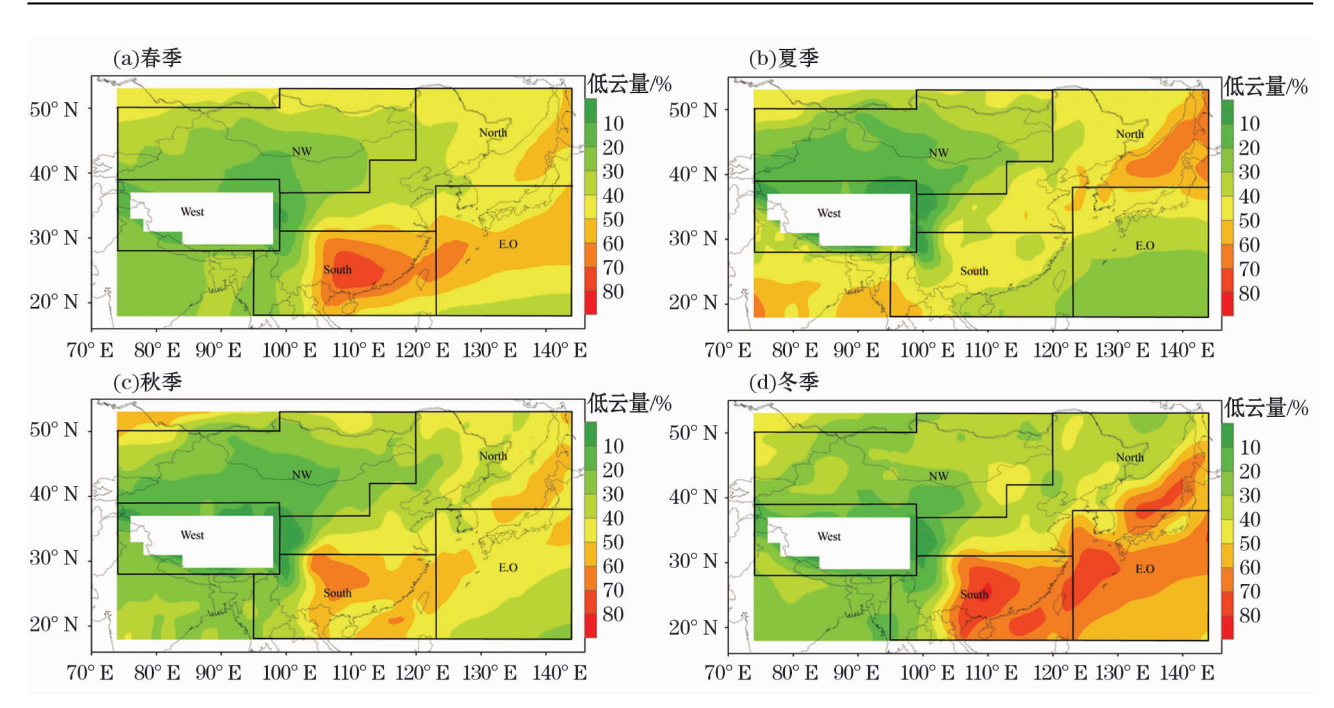


图 2　2003—2016 年单层低云量多年季节平均的空间分布

Fig. 2　The multi-year seasonal average spatial distribution of single-layer low cloudage over different regions from 2003 to 2016

异,低云量较多的区域均为南方地区和北方地区的海域及其近海大陆[25]。这是因为低云中水滴较多,以上区域大气湿润度也较高。而低云量偏少的区域均在西北干旱地区。春、秋、冬季东亚单层低云量的空间分布相似,高值区(46% ~82%)均位于南方地区、东部海域和北方地区的日本海,这一点与汪会等[24]的研究结果一致。这是因为大部分的低云中水滴较多,而南方地区和东部海域上空冬季受温湿度比较高的西南气流的影响[26],水汽都很丰富。而夏季的高值区位于北方地区,地处日本海北部,超过58%。冬季有 3 个高值区(70% ~82%),分别位于南方地区、东部海域和北方地区的日本海。东部海域和日本海云量较多,主要是在冬季,海洋是暖性下垫面,低空处水汽密集,为形成低云提供了条件,同时低温又阻止了水汽进一步向高空输送[24]。南方地区受流入南海北部的巴士海峡黑潮的影响,导致该区域海水温度偏高,与周边区域的低温形成温度梯度,有利于局地环流产生,使得冬季低云范围扩大且云量增多[27]。

另外,对比各个区域四季的空间分布可以看出,东部海域单层低云量的高值区四季都在近海区域;南方地区作为湿润大陆,其春、秋、冬三季的高值区位于云贵高原,单层低云量都大于 70%;而夏季,南方地区的高值区则往西南角移动至缅甸境内。西北干旱地区的单层低云量四季都处于低水平状态,少部分区域最大也只能达到 50%,低值区的单层低云量则在 10% 以下。

3　单层低云冰/液态水柱含量的季节时空变化

3.1　多年平均的季节变化

从 4 个区域的单层低云液态水柱含量(liquid water path,LWP)四季变化来看(表 2),春、秋季的含量比较接近,冬、夏季则相差较大。其中,冬、夏季差异最大的是南方地区,相差 53.42 g · m^{-2};这与南方冬、夏季气候差异明显有关。差异最小的是北方地区,差值为 19.9 g · m^{-2}。北方地区、南方地区、西北地区和东部海域的四季低云 LWP 的最大均值都出现在冬季,平均值分别为 67.75 g · m^{-2}、90.55 g · m^{-2}、78.63 g · m^{-2}和 66.63 g · m^{-2}。北方地区、南方地区和东部海域四季低云 LWP 的最小均值都出现在夏季,均值分别为 47.85 g · m^{-2}、37.13 g · m^{-2}和 33.90 g · m^{-2}。西北地区则在春季,均值为 35.78 g · m^{-2}。

单层低云冰水柱含量(ice water path,IWP)的四季变化(表 3)与 LWP 相似,北方地区、南方地区、西北地区和东部海域的最大均值依然在冬季,均值分别为 52.63 g · m^{-2}、43.66 g · m^{-2}、58.23 g · m^{-2}和 40.51g · m^{-2};4个区域IWP的最小均值都在夏季,

表 2　2003—2016 年不同区域单层低云液态水柱含量平均值的季节变化

Tab. 2　Seasonal change of the mean of liquid water path of single-layer low cloud over different regions from 2003 to 2016

/($g \cdot m^{-2}$)

季节	North	South	NW	E. O	季节	North	South	NW	E. O
春	48.77	49.43	35.78	41.38	秋	51.60	56.79	45.91	40.52
夏	47.85	37.13	37.17	33.90	冬	67.75	90.55	78.63	66.63

表 3　2003—2016 年不同区域单层低云冰水柱含量平均值的季节变化

Tab. 3　Seasonal change of the mean of ice water path of single-layer low cloud over different regions from 2003 to 2016)

/($g \cdot m^{-2}$)

季节	North	South	NW	E. O	季节	North	South	NW	E. O
春	40.10	20.63	49.76	19.09	秋	48.81	23.10	57.35	17.18
夏	26.55	19.18	18.89	12.73	冬	52.63	43.66	58.23	40.51

分别为 26.55 $g \cdot m^{-2}$、19.18 $g \cdot m^{-2}$、18.89 $g \cdot m^{-2}$ 和 12.73 $g \cdot m^{-2}$。这是因为夏季温度普遍较高，水汽难以在对流层低层结成冰晶。冬季均值最大的地区是西北地区，最小的是东部海域；而夏季均值最大的是北方地区，均值最小的是东部海域。由此可知，对于东亚地区 IWP 的四季变化，海洋部分始终是含量最少的区域。

3.2　多年平均的季节空间分布

东亚地区单层低云的冰水柱含量的季节变化较为显著。如图 3 所示，春秋两季的空间分布具有明显的南北差异，高值区均分布在 40°N 以北区域。春季高值区位于北部地区的东北角，局部大于 130 $g \cdot m^{-2}$，低值区位于南方地区的云南省，小于 10 $g \cdot m^{-2}$；除此之外，西北地区春季整体的冰水柱含量均高于其他区域。南方地区春季低云的冰水柱整体含量最低，均小于 50 $g \cdot m^{-2}$。夏季整个东亚地区 IWP 值均较低，没有显著的高值区存在。秋季的高值区位于西北地区，最大值在 140 $g \cdot m^{-2}$ 以上。冬季高值区分布在西北地区的西北部和北方地区东北部，最大值大于 130 $g \cdot m^{-2}$；含量小于 10 $g \cdot m^{-2}$ 的低值区则位于南方地区的缅甸附近。

与 IWP 不同的是，东亚地区单层低云的 LWP 四季最值区的分布位置与大气湿润度有着较密切的联系。春秋两季 LWP 的空间分布相似，高值区均集中于南方地区的云贵高原、长江中下游平原地区和北方地区东北部，最大值在 90 $g \cdot m^{-2}$ 以上；但春季的空间分布具有更明显的东西差异。春秋两季的低值区均集中于西北干旱地区与西部地区的交界处，最小值在 20 $g \cdot m^{-2}$ 以下。而且春秋两季各个区域的 LWP 空间分布都以最值区为中心向外发散，有较明显的梯度。夏季的高值区集中在南方地区的西南角[28] 和北方地区的东北角；低值区集中于西北地区的阿尔金山与祁连山附近。冬季则有大面积的高值区出现，除了西北干旱地区和东部海域的太平洋区域，其他区域的湿润大陆部分的液态水柱含量均在 90 $g \cdot m^{-2}$ 以上。其中，东部海洋部分的液态水柱含量在 50 ~ 60 $g \cdot m^{-2}$，高于西北干旱地区。

4　单层低云短波辐射强迫的季节时空分布

为了定量的表述云物理属性对太阳辐射的影响，Ramanathan[29] 将短波辐射强迫定义为有云时的地面短波辐射通量与晴空下的地面短波辐射通量之差，是表征云对太阳辐射削减量的一个物理参数。如式(1)所示：

$$C_f(S) = F - F_C \tag{1}$$

式中：$C_f(S)$ 表示云短波辐射强迫，$W \cdot m^{-2}$；F 表示有云天短波辐射通量，$W \cdot m^{-2}$；F_C 表示晴空短波辐射通量，$W \cdot m^{-2}$。

4.1　多年平均的季节变化

从表 4 的多年平均值来看，单层低云的地面短波辐射强迫具有鲜明的区域特征。4 个区域中，南方地区的单层低云对太阳辐射的削弱效应最强，短波辐射强迫值为 -160.80 $W \cdot m^{-2}$，东部海域的低云辐射效应最弱，为 91.57 $W \cdot m^{-2}$，两者相差达到 69.23 $W \cdot m^{-2}$；其他区域依次为北方地区与西北地区。北方地区夏季的短波辐射强迫值最大，为 -160.34 $W \cdot m^{-2}$，春季次之，与夏季相差不大；冬

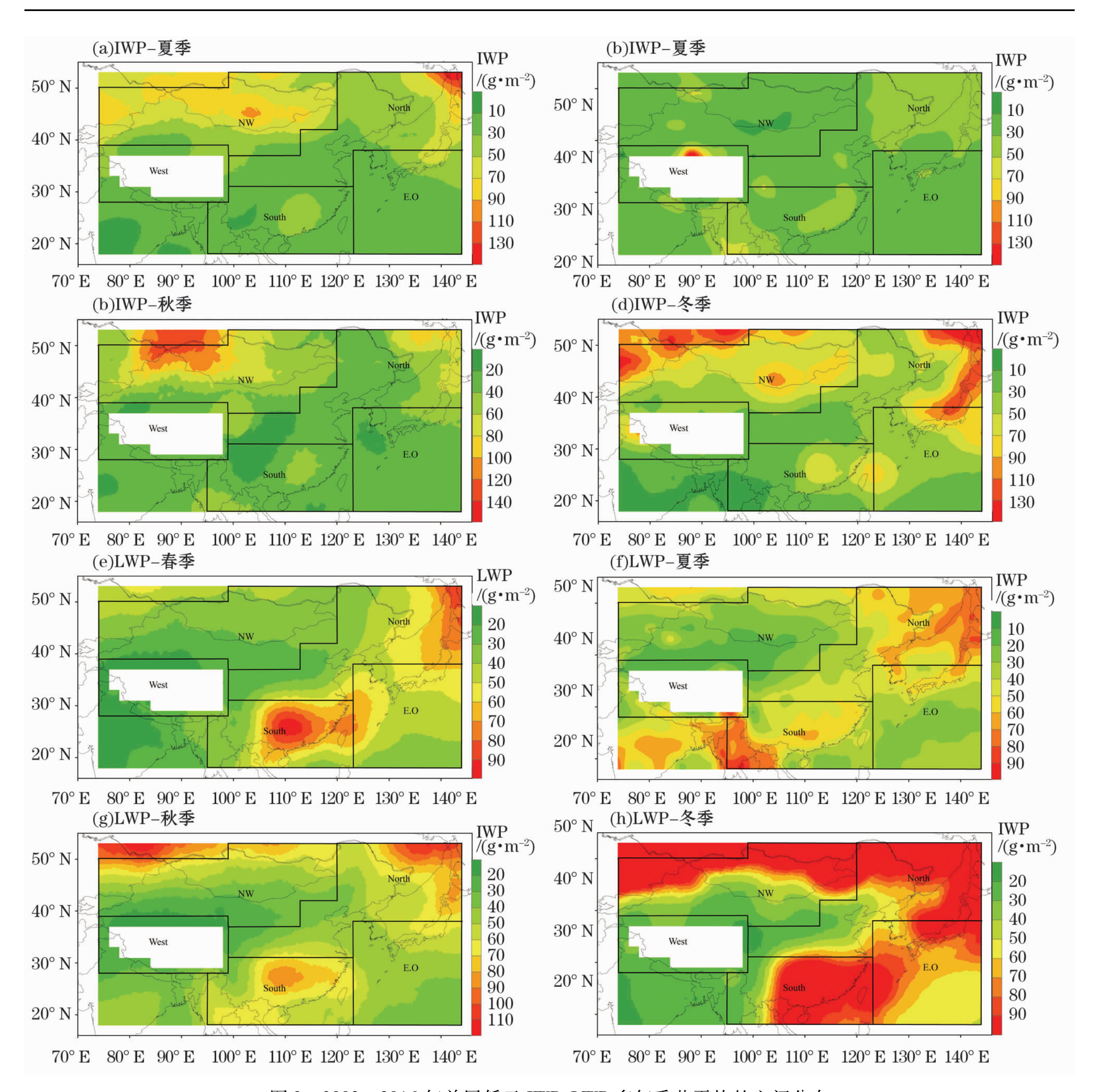


图 3　2003—2016 年单层低云 IWP、LWP 多年季节平均的空间分布

Fig. 3　Multi-year seasonal average spatial distribution of ice water path and liquid water path of single-layer low cloud from 2003 to 2016)

表 4　2003—2016 年不同区域地面低云短波辐射强迫多年平均的季节变化

Tab. 4　Seasonal change of the multi-year mean of low cloud shortwave radiation over different regions from 2003 to 2016　/(W · m^{-2})

季节	North	South	NW	E. O
春	157.95	-215.55	-138.03	-121.49
夏	-160.34	-100.83	-95.88	-64.04
秋	-127.65	-123.76	-110.96	-42.06
冬	-81.05	-203.07	-53.10	-138.68
多年平均值	-131.75	-160.80	-99.49	-91.57

季的短波辐射强迫值最小,为 -81.05 W · m^{-2}。相反,南方地区冬季的辐射强迫值最大,为 -203.07 W · m^{-2};夏季的最小,为 -100.83 W · m^{-2}。这与南方地区低云量、LWP 与 IWP 的季节变化特征有着很好的一致性。西北地区春季的低云冷却效应最强,冬季最弱,其值分别为 -138.03 W · m^{-2} 和 -53.10 W · m^{-2}。这是因为西北地区春季的光学厚度较大,增强了短波辐射强迫。东部海域的最小值和最大值分别在秋冬两季,辐射强迫值分别为 -42.06 W · m^{-2}和 -138.68 W · m^{-2}。同样,东部

海域冬季的低云量、LWP 和 IWP 都是最大的。

4.2 多年平均的季节空间分布

对比图 4 可知,除夏季外,其他季节最强的低云冷却效应都在大气湿润度最大的南方地区,特别是云贵高原,负辐射强迫的绝对值均大于 250 W · m^{-2}。而云贵高原也是低云量与液态水柱含量在春、秋、冬季的最高值区。在春季,湿润的南方地区负辐射强迫值的高值区范围是最大的。秋季,除了南方地区,北方地区的东北角和西北地区的西北角也是负辐射强迫值较高的区域。夏季,整个东亚地区不仅显示了低云较弱的冷却效应,而且辐射强迫值的区域差异也非常明显。同样,整个东亚地区的低云量与液态水柱含量在夏季也有着相似的变化趋势。除了四川盆地周围的负辐射强迫的绝对值大于 400 W · m^{-2},其余大片区域的负辐射强迫绝对值都小于 200 W · m^{-2};西北地区以及南方地区和东部海域的海洋部分的负辐射强迫绝对值都小于 100 W · m^{-2};北方地区辐射强迫值的空间分布呈现出较明显的海陆差异:大陆区域在 −100 ~ −200 W · m^{-2},而其日本海附近在 −200 ~ −300 W · m^{-2}。冬季,辐射强迫的空间差异更明显:东亚的西北部呈现较弱的冷却效应,负辐射强迫的绝对值都小于 100 W · m^{-2};而东南部呈现的是较强的冷却效应,负辐射强迫绝对值小于100 W · m^{-2}。

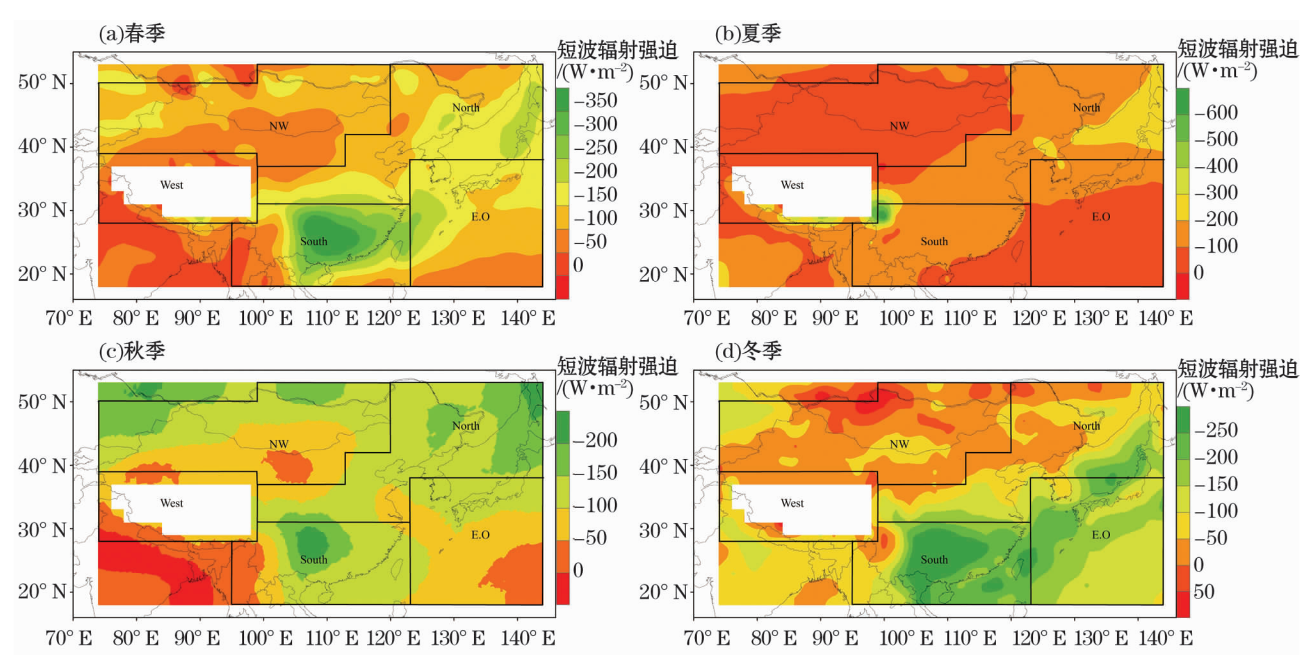


图 4 2003—2016 年不同区域地面短波辐射强迫多年平均的季节空间分布

Fig. 4 Multi-year average seasonal distribution of downward shortwave radiative forcing over different regions from 2003 to 2016

由此可知,短波辐射强迫的空间分布与低云量、液态水柱含量是相互对应的。

5 不同区域单层低云物理属性与短波辐射的相关度

由于东亚不同区域之间地形与气候特征的差异,低云对太阳辐射的影响也会有区域差异。虽然整体上低云量与地面短波辐射通量均呈现负相关,但不同区域低云量对太阳辐射的削弱程度却是不一样的。因此,本文在分区的基础上,利用 Pearson 系数来计算各区域间单层低云量与地面短波辐射通量的相关性。判定系数 R^2 取值在 0 ~ 1 之间,表示两者的相关程度。R^2 越接近 1,两者的相关程度越高。

由图 5 可知,4 个区域中单层低云云量与地面短波辐射相关性最高的是南方区域,相关系数高达 0.71。正如徐华[30]的研究结果一样,在南方地区,低云量是削弱太阳辐射的主导因素。东部海域和西北地区两者的相关程度相近,判定系数分别为 0.40 和 0.53。北方地区低云量对向下短波辐射的影响最小,相关系数只有 0.19。也就是说,在北方地区,低云量并不是影响太阳辐射的主要因子。北方地区包括华北平原与长江三角洲等经济发达区域,可能是人类活动引起的环境问题影响了低云对太阳辐射的直接削弱。西北地区由于低云卫星数据的缺失,

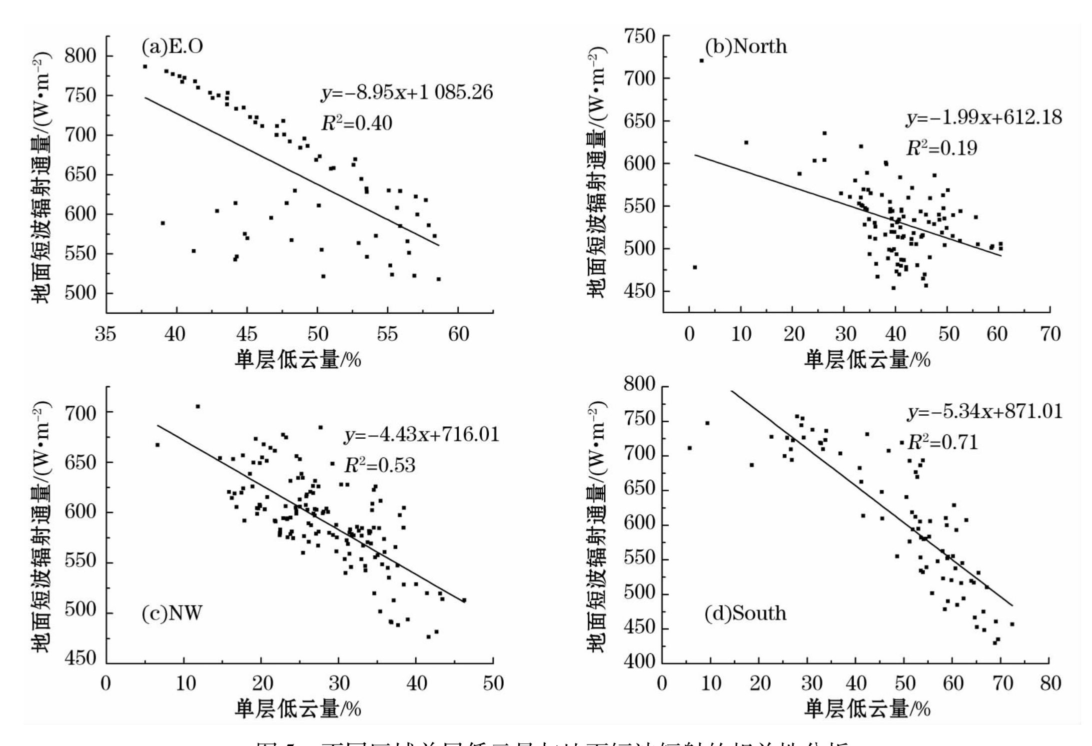


图 5　不同区域单层低云量与地面短波辐射的相关性分析

Fig. 5　Correlation analysis between single-layer low cloudage and shortwave radiation in different regions

表 5　不同区域冰/液态水柱含量与短波辐射的相关性分析

Tab. 5　Correlation analysis between ice/liquid water path and shortwave radiation in different regions

	样本数	LWP	IWP
North	108	0.50	0.30
E. O	70	0.52	0.36
South	82	0.80	0.25
NW	149	0.52	0.05
West	–	–	–

在这里不做过多的分析。

由表 5 可知,液态水柱含量与向下短波辐射相关性最高的也是南方区域,相关系数达到了 0.80,相比于低云量提高了 0.09。由此可知,液态水柱含量相比于低云量与太阳辐射的关系更加密切。相反,冰水柱含量相关性最高的区域为北方区域,R^2 为 0.36;5 个区域的相关性普遍较低,均在 0.4 之下。所以,冰水柱含量并不是削弱太阳辐射的主要因子。

6　结 论

(1) 在季节变化上,四季中,南方地区、西北地区和东部海域的最大均值出现在冬季,均值分别为 61.55%、29.57% 和 59.63%;而北方地区的最大值均值都出现在夏季,均值为 40.33%。在空间变化上,春、秋、冬季东亚单层低云量的空间分布相似,高值区(46% ~82%)均位于南方地区、东部海域和北方地区的日本海;其中,南方地区春、秋、冬季高值区的云量始终是最多的,单层低云量都大于 70%。夏季的高值区位于北方地区的日本海北部,单层低云量超过 58%。西北干旱地区的单层低云量四季都处于低水平状态,低值区的单层低云量则在 10% 以下。

(2) 4 个区域的单层低云的冰/液态水柱含量的四季变化较相似,最大均值都在冬季。而季节空间分布差异则比较显著。对于单层低云的冰水柱含量,春、秋、冬季的空间分布相似,高值区均分布在 40°N 以北区域;夏季整个东亚地区冰水柱含量均较低,没有显著的高值区存在。对于与大气含水量密切相关的液态水柱含量,其高值中心都出现在水汽较为丰富的湿润区。春、秋两季的高值区集中于南方地区的东南丘陵、长江中下游平原地区和北方地区东北部,液态水柱含量都大于 90 g · m^{-2};夏季的高值区集中在南方地区的西南角和北方地区的东北角;冬季则有大面积的高值区出现。

(3) 在季节变化上,常年湿润的南方地区在四季中均是低云冷却效应最强的区域。在空间分布

上,短波辐射强迫的空间分布与低云量、液态水柱含量有着一定的一致性。表明在春、秋、冬三季,云贵高原不仅是单层低云冷却效应最强区域,其负辐射强迫绝对值大于 250 $W \cdot m^{-2}$;也是单层低云量与液态水柱含量的高值区。夏季,整个东亚地区显示了低云较弱的冷却效应,除了四川盆地周围,其余大片区域的负辐射强迫绝对值都小于 200 $W \cdot m^{-2}$。同样,夏季的低云量与液态水柱含量也处于较低的水平。

(4) 对比各个区域不同云物理属性与地面短波辐射的相关性程度,可以看出,单层低云的云量及其液态水柱含量与地面短波辐射相关性最高的地区均为南方区域;而冰水柱含量与地面短波辐射相关程度最高的则在东部海域。对比 3 个不同的物理属性可知,液态水柱含量是与地面短波辐射最密切的因子。

参考文献(References):

〔1〕 Harry D,Kambezidis. The solar radiation climate of Athens:Variations and tendencies in the period 1992 – 2017,the brightening era〔J〕. Solar Energy,2018,173:328 – 347.

〔2〕 黄家敏,杨洪海,陈勇航,等. 基于 GEWEX-SRB 资料的新疆地区太阳辐射时空分布特征〔J〕. 太阳能学报,2017,38(2):516 – 523.〔Huang Jiamin,Yang Honghai,Chen Yonghang,et al. Spatial and temporal distribution of solar radiation in Xingjiang area based on GEWEX-SRB data〔J〕. Acta Energiae Solaris Sinica, 2017,38(2):516 – 523.〕

〔3〕 赵东,罗勇,高歌,等. 我国近 50 年来太阳直接辐射资源基本特征及其变化〔J〕. 太阳能学报,2009,30(7):946 – 952.〔Zhao Dong,Luo Yong,Gao Ge,et al. Essential characteristics of solar direct radiation over recent 50 years in china〔J〕. Acta Energiae Solaris Sinica ,2009,30(7):946 – 952.〕

〔4〕 Ramanathan V,Cess R D,Harrison E F,et al. Cloud radiation forcing and climate:Results from the earth radiation budget experiment〔J〕. Science,1989,243:57 – 63.

〔5〕 Harrison E F,Minnis P,Barkstrom B R,et al. Seasonal variation of cloud radiation forcing derived from the earth radiation budget experiment〔J〕. Journal of Geophysical Research,1990,95:18 687 – 18 703.

〔6〕 刘艳,翁笃鸣. 中国地区云对地—气系统辐射强迫温度效应的气候研究〔J〕. 气象学报,2002,60(6):766 – 773.〔Liu Yan, Weng Duming. Climatological study of temperature effects of cloud-radiative forcing in the earth-atmospheric system over China〔J〕. Acta Meteorologica Sinica,2002,60(6):766 – 773.〕

〔7〕 Ramanathan V. Warm pool heat budget and short-wave cloud forcing,a missing physics〔J〕. Science,1995,267:499 – 503.

〔8〕 Pilewskie P,Valero F P J. Direct Observations of Excess Solar Absorption by Clouds〔J〕. Science,1995,267(5 204):1 626 – 1 629.

〔9〕 马晓燕,季国良. 利用 ERBE 资料分析中国地区云辐射强迫的时空变化〔J〕. 高原气象,2000,19(2):150 – 158.〔Ma Xiaoyan,Ji Guoliang. Analysis of temporal and spatial variations for cloud radiative forcing in China〔J〕. Plateau Meteorology,2000,19(2):150 – 158.〕

〔10〕 陈勇航,白鸿涛,黄建平,等. 西北典型地域云对地气系统的辐射强迫研究〔J〕. 中国环境科学,2008,28(2):97 – 101.〔Chen Yonghang,Bai Hongtao,Huang Jianping,et al. Comparison of cloud radiative forcing on the atmosphere-earth system over Northwestern China with respect to typical geo-topographic regions〔J〕. China Environmental Science,2008,28(2):97 – 101.〕

〔11〕 陈春美,钟珂,陈勇航,等. 干旱区典型城市云对太阳辐射的影响〔J〕. 干旱区研究,2018,35(2):436 – 443.〔Chen Chunmei, Zhong Ke,Chen Yonghang,et al. Effects of clouds on solar radiation over typical city in arid area〔J〕. Arid Zone Research,2018, 35(2):436 – 443.〕

〔12〕 刘艳,高歌,成天涛,等. 中国地区云对地气系统太阳短波吸收辐射强迫的气候研究〔J〕. 气象科学,2000,20(3):260 – 269.〔Liu Yan, Gao Ge, Cheng Tiantao, et al. Climatology of cloud effects on earth-atmosphere system absorbed shortwave radiation forcing in China〔J〕. Cientia Meteorologica Sinica,2000,20(3): 260 – 269.〕

〔13〕 汪方,丁一汇. 全球气候模式对东亚地区地表短波辐射的模拟检验〔J〕. 应用气象学报,2008,19(6):750 – 759.〔Wang Fang, Ding Yihui. Validation of simulation on surface shortwave radiation over East Asia by global climate models〔J〕. Journal of Applied Meteorological Science,2008,19(6):750 – 759.〕

〔14〕 彭杰,张华,沈新勇. 东亚地区云垂直结构的 CloudSat 卫星观测研究〔J〕. 大气科学,2013,37(1):91 – 100.〔Peng Jie,Zhang Hua,Shen Xinyong. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data〔J〕. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2013,37(1):91 – 100.〕

〔15〕 张华,杨冰韵,彭杰,等. 东亚地区云微物理量分布特征的 CloudSat 卫星观测研究〔J〕. 大气科学,2015,39(2):235 – 248.〔Zhang Hua,Yang Bingyun,Peng Jie,et al. The characteristics of cloud microphysical properties in East Asia with the CloudSat data set〔J〕. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2015, 39(2):235 – 248.〕

〔16〕 Li Jiming,Yi Yuhong,Minnis P,et al. Radiative effect differences between multi-layered and single-layer clouds derived from CERES, CALIPSO,and CloudSat data〔J〕. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer,2010,112(2):361 – 375.

〔17〕 Chang F L,Li Z Q. A near-global climatology of single-layer and overlapped clouds and their optical properties retrieved from terra/MODIS data using a new algorithm〔J〕. Journal of Climate,2005, 18:4 752 – 4 770.

〔18〕 周毓荃,欧建军. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究〔J〕. 气象,2010,36(11):50 – 58.〔Zhou Yuquan,Ou Jianjun. The method of cloud vertical structure analysis using upper-air observation and its studying of application〔J〕. Meteorological Monthly,2010,36(11):50 – 58.〕

〔19〕 王帅辉,韩志刚,姚志刚,等. 基于 CloudSat 资料的中国及周边地区云垂直结构统计分析〔J〕. 高原气象,2011,30(1):38 – 52.〔Wang Shuaihui,Han Zhigang,Yao Zhigang,et al. Analysis on cloud vertical structure over China and its neighborhood based on CloudSat data〔J〕. Plateau Meteorology,2011,30(1):38 – 52.〕

〔20〕 王秀俊. 云对太阳辐射的影响〔J〕. 科技风,2012(7):96 - 99.〔Wang Xiujun. The influence of clouds on solar radiation〔J〕. Science and Technology,2012(7):96 - 99.〕

〔21〕 伯玥,王艺,李嘉敏,等. 青藏高原地区云水时空变化特征及其与降水的联系〔J〕. 冰川冻土,2016,38(6):1 679 - 1 690.〔Bo Yue,Wang Yi,Li Jiamin,et al. Temporal and spatial variation features of cloud water and its relation to precipitation over the Tibetan Plateau〔J〕. Journal of Glaciology and Geocryology,2016,38(6):1 679 - 1 690.〕

〔22〕 张婷婷. 基于 ISCCP_D2 数据资料对我国近十年低云变化特征研究〔J〕. 安徽农业科学,2014,42(36):12 995 - 12 997,13 011.〔Zhang Tingting. Research on the characteristics of low cloud change in China in recent ten years based on ISCCP_D2 data〔J〕. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2014,42(36):12 995 - 12 997,13 011〕

〔23〕 赵济. 中国自然地理〔M〕. 北京:高等教育出版社,1995.〔Zhao Ji. Physical Geography of China〔M〕. Beijing:Higher Education Press,1995.〕

〔24〕 汪会,罗亚丽,张人禾. 用 CloudSat/CALIPSO 资料分析亚洲季风区和青藏高原地区云的季节变化特征〔J〕. 大气科学,2011,35(6):1 117 - 1 131.〔Wang Hui,Luo Yali,Zhang Renhe. Analyzing seasonal variation of clouds over the Asian Monsoon Regions and the Tibetan Plateau Region using CloudSat/CALIPSO data〔J〕. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2011,35(6):1 117 - 1 131.〕

〔25〕 贾海灵,马晓燕,熊飞麟. 中国东部大陆和邻近海域暖云特性时空分布及其与气象条件的关系〔J〕. 气候与环境研究,2018,23(6):737 - 748.〔Jia Hailing,Ma Xiaoyan,Xiong Feilin. Spatial and temporal distributions of warm cloud properties in Eastern China and its adjacent ocean and their relationships with meteorological conditions〔J〕. Climatic and Environmental Research,2018,23(6):737 - 748.〕

〔26〕 张亚洲. 南海及周边地区云量分布及低云量与南海海温的关系〔J〕. 气象科学,2012,32(3):260 - 268.〔Zhang Yazhou. Distribution of the cloud amount and correlation between low cloud and the temperature over the South China Sea〔J〕. Scientia Meteorologica Sinica,2012,32(3):260 - 268.〕

〔27〕 中国科学院大气物理研究所. 天气学知识〔M〕. 北京:科学出版社,1978.〔Institute of Atmospheric Physics,Chinese Academy of Sciences. Knowledge of Meteorology〔M〕. Beijing:Science Press,1978.〕

〔28〕 杨冰韵,张华,彭杰,等. 利用 CloudSat 卫星资料分析云微物理和光学性质的分布特征〔J〕. 高原气象,2014,33(4):1 105 - 1 118.〔Yang Bingyun,Zhang Hua,Peng Jie,et al. Analysis on global distribution characteristics of cloud microphysical and optical properties based on the CloudSat data〔J〕. Plateau Meteorology,2014,33(4):1 105 - 1 118.〕

〔29〕 Ramanathan V. The role of earth radiation budget studies in climate and general circulation research〔J〕. Journal of Geophysical Research,1987,92:4 075 - 4 095.

〔30〕 徐华. 中国太阳辐射区域影响因子研究〔D〕. 青岛:中国海洋大学,2013.〔Xu Hua. Study on Regional Influence Factors of Solar Radiation in China〔D〕. Qingdao:Ocean University of China,2013.〕

Seasonal Variation of Single-layer Low Cloud Physical Properties and Radiative Forcing in East Asia

SI Yu-wen[1], ZHENG Ning[1], YANG Hong-hai[1], CHEN Yong-hang[1], LIU Qiong[1], XIA Jun-rong[2], ZHANG Hua[3]

(1. *College of Environmental Science and Engineering*, *Donghua University*, *Shanghai* 201620, *China*;
2. *Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration*, *NUIST*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*;
3. *State Key Laboratory of Severe Weather*, *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The data from Clouds and the Earth's Radiant Energy System were used to study the distribution of low-cloud physical properties and downward shortwave radiative forcing in different regions of East Asia from 2003 to 2016. The results are as follows: ① The variation of single-layer low cloud radiation forcing was similar with the single-layer low cloud fraction in spring and autumn, and there was a good consistency with the ice/liquid water path in spring, summer and autumn; ② Temporally, the weakening effect of single-layer low cloud on shortwave radiation was the strongest in the north and west in summer. The strongest weakening effect in the south and northwest occurred in spring; that in the eastern ocean occurred in winter. In terms of spatial distribution, except for summer, the strongest single-layer low cloud weakening effect in other seasons occurred in the south. In summer, the single-layer low cloud in the East Asia had a weaker effects on shortwave radiation, and the absolute value of the radiation forcing was less than 200 $W \cdot m^{-2}$.

Key words: single-layer cloud; low cloud; cloud physical property; shortwave radiative forcing; East Asia;